

УДК 681.142.64

ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ВЫБОРЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ

© А. Ф. Берман¹, Г. С. Малтугуева¹, А. Ю. Юрин^{1,2}*Статья поступила 17 декабря 2014 г.*

Рассмотрен подход, обеспечивающий поддержку принятия решений при выборе конструкционных материалов. Правильный выбор материала — основа обеспечения прочности, ресурса и безопасности создаваемого и модернизируемого оборудования. Разработано алгоритмическое обеспечение, основанное на совместном применении прецедентного подхода и методов многокритериального выбора. Создана интеллектуальная программная система поддержки принятия решений, реализующая предложенный подход.

Ключевые слова: выбор материала; поддержка принятия решений; прецедентный подход; многокритериальный выбор; программное обеспечение.

При решении конструкторских задач в области машиностроения, например, при проектировании или ремонте изделия (детали) требуется обосновать выбор конструкционного материала. Аналитический обзор показал, что данная задача является многовариантной, так как для изготовления какой-либо детали можно выбрать некоторое множество материалов, удовлетворяющее условиям эксплуатации, изготовления и ремонта (восстановления). Как правило, при этом необходимо учитывать целый ряд условий: последствия в результате повреждения или разрушения детали; режимы и условия эксплуатации; технологию изготовления и ремонта; технологическую наследствен-

ность; стоимость; доступность и др. Эти условия неоднозначно оцениваются специалистами, принимающими решения [1 – 4]. Для обработки имеющихся данных применяется широкий набор методов, которые можно разделить на две большие группы: методы многокритериального выбора [5 – 13] и методы искусственного интеллекта (системы, основанные на знаниях) [14 – 18].

Методы многокритериального выбора, позволяя оценить материалы и упорядочить их по степени пригодности, требуют обсуждения, обмена мнениями, получения большого объема информации от участников (экспертов), явного определения набора критериев и вида шкалы для оценивания каждого варианта решения всеми членами коллектива (группы), что не всегда возможно. Кроме того, они не позволяют учитывать

¹ Институт динамики систем и теории управления им. В. М. Матросова СО РАН, г. Иркутск, Россия; e-mail: berman@icc.ru

² Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия; e-mail: j80@yandex.ru

опыт применения материалов при решении подобных задач, возникавших ранее.

Методы искусственного интеллекта подразделяются на использующие правила типа «ЕСЛИ ..., ТО» [14, 15, 19], таблицы решений и теорию графов [18], нечеткие структуры и множества [16], прецедентный подход [17]. При этом основная сложность применения методов данной группы состоит в доказательстве достоверности и объяснении полученных результатов.

В связи с этим актуальным является создание гибридных методов, например, на основе совместного применения методов многокритериального выбора и прецедентного подхода (поиска решения «по аналогии»).

Создание подобного метода позволяет объединить возможность выбора конструкционных материалов на основании существующего опыта применения материалов в подобных конструкциях [1 – 4], по описанию их эксплуатационных и технологических свойств [21] и объяснению (обоснованию) полученного решения на основе математической теории многокритериального выбора.

При этом отметим отсутствие отечественного программного обеспечения, автоматизирующего решение данной задачи несмотря на то, что использование информационных технологий и систем повышает эффективность процесса ее решения [22 – 24]. Не обеспечивает обоснование выбора материала и отечественная система автоматизированного проектирования КОМПАС-3D.

Цель данной работы — повышение качества принятия решений при выборе конструкционных материалов с помощью разработанной Интеллектуальной программной системы поддержки принятия решений (ИС ППР). В качестве методологической основы процесса принятия решений предложено объединить подходы «по прецедентам» (для поиска возможных вариантов) и методы многокритериального выбора (для получения упорядоченного перечня вариантов и подтверждения достоверности полученного решения). При этом в качестве прецедентов использована информация из БД по отказам оборудования [25], включающая данные как о материале отказавшего объекта, так и о материалах, рекомендуемых при ремонте (зафиксированных в рекомендованных и принятых мероприятиях). В свою очередь, в качестве методов многокритериального выбора для решения данной задачи использованы методы вербального анализа — ЗАПРОС, МАСКА, АРАМИС, ПАКС [20], так как они позволяют одновременно обрабатывать как числовые, так и вербальные оценки альтернатив.

Принятие решений всегда сопряжено с необходимостью оценивания всех возможных вариантов по набору критериев, каждый из которых измеряется по собственной шкале.

Для решения задачи выбора материалов необходимо упорядочить все пригодные конструкционные ма-

териалы по убыванию степени их предпочтительности, которая основывается на значениях их характеристик и максимальной приближенности к заданным условиям и целям (например, требования к жаропрочности, коррозионной стойкости, трещиностойкости, наличие в требуемом количестве и по приемлемой цене у ближайшего производителя).

Обозначим $A = (A_1, A_2, \dots, A_n)$ множество всех возможных конструкционных материалов, из которых необходимо выбрать k вариантов $X = (X_1, X_2, \dots, X_k)$, $X \subset A$, удовлетворяющих заданной цели и имеющимся условиям (ограничениям). После этого упорядочим отобранные варианты в порядке убывания степени их предпочтительности для лица, принимающего решение (ЛПР), которая основывается на наборе критериев $C = (C_1, C_2, \dots, C_m)$. В виде критериев можно представить требуемые характеристики.

Для решения поставленной задачи предлагаем применить: рассуждения на основе прецедентов (case-based reasoning) [26 – 28], что обеспечит поиск материалов, подходящих под определенные условия функционирования (эксплуатации), исходя из опыта их применения; методы многокритериального выбора [20] для упорядочения выбранных конструкционных материалов в соответствии со значениями их характеристик и мерой близости аналогов и подтверждения достоверности полученного решения.

Прецедентный подход

Прецедентный подход основывается на принципе принятия решений «по аналогии» [26, 29]. Для его эффективного применения не требуется глубокого анализа предметной области, достаточно описания проблемы и ее решения путем показа нескольких примеров, указания аналогичных случаев и ссылок на некоторое сходство. В том случае, если к моменту возникновения новой проблемы уже накоплен значительный опыт решения похожих проблем, описания отказов на разнородном нефтехимическом оборудовании, то применение прецедентного подхода позволяет не только обеспечить поддержку лица, принимающего решение, но и повысить эффективность повторного использования накопленного опыта.

В данной области одним из основных является понятие «прецедент» — компактное описание знаний о событиях, явлениях, процессах и состояниях, содержащее наиболее важные параметры и свойства событий, процессов и рассматриваемого объекта [29], предназначенное для автоматизированной обработки с помощью программных средств. Как правило, прецедент состоит из описания проблемной ситуации и совокупности действий, предпринимаемых для ее устранения, т.е. решения.

Формально это может быть представлено следующим образом:

Прецедент = (Проблема, Решение).

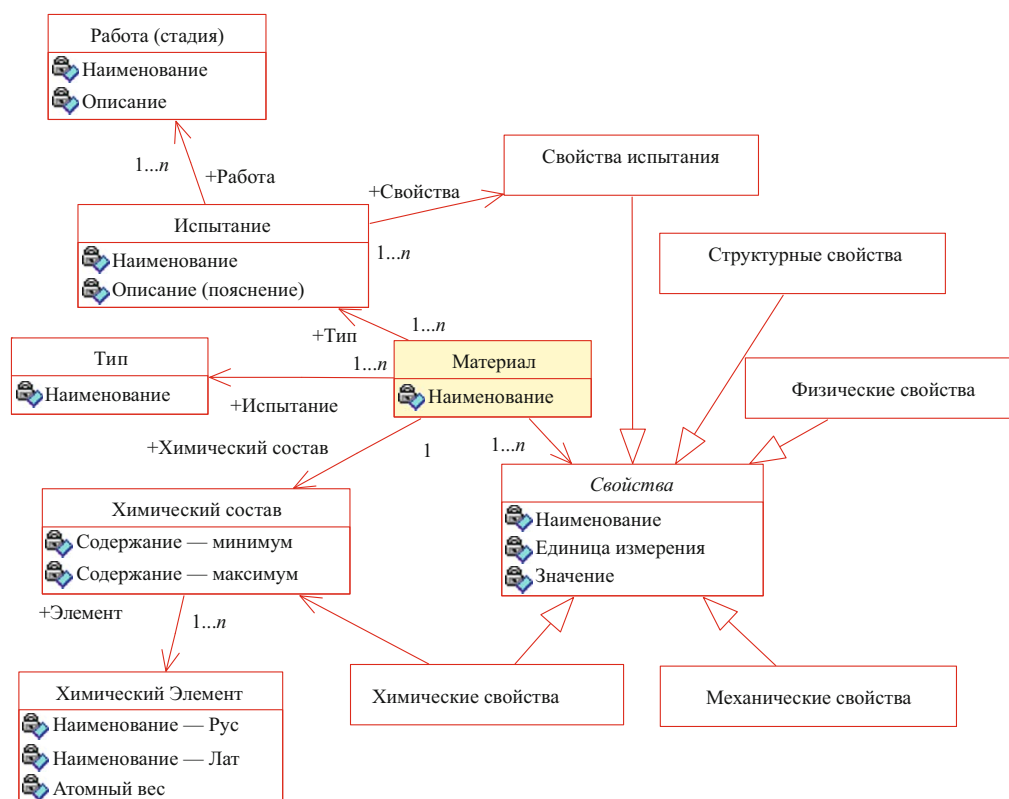


Рис. 1. Фрагмент визуальной (объектной) модели понятия «Материал»

Принятие решений на основе прецедентов (case-based reasoning, CBR) как отдельное направление исследований в области систем, основанных на знаниях, сфокусировано, прежде всего, на решении проблем с помощью накопленного опыта, что связано с разработкой и исследованием методов представления (моделирования), оценки, хранения и индексации, извлечения и адаптации фактических знаний.

Процесс решения задачи при данном подходе представляет собой идентификацию (распознавание) проблемной ситуации — прецедента по заданному (вводимому пользователем) набору идентификационных признаков. При этом основное внимание уделяется следующим этапам [26, 29].

1. *Извлечение наиболее похожего прецедента(ов) (Retrieve)*. При этом происходит распознавание текущей проблемной ситуации и поиск похожих ситуаций, содержащихся в специальном хранилище (базе прецедентов), с использованием различных метрик. Извлеченные прецеденты считаются аналогами — их описание подобно описанию рассматриваемой проблемной ситуации, т.е. содержит подобные признаки (свойства) и близкие значения этих признаков.

2. *Повторное использование информации, содержащейся в извлеченном прецеденте(ax) (Reuse) с необходимой ее адаптацией*. Под адаптацией прецедента понимается изменение решения найденного прецедента с учетом особенностей текущей проблемной ситуации. Данный этап осуществляется путем качест-

венного переопределения описания прецедента и/или путем уточнения значений параметров.

3. *Проверка корректности нового решения (Revise)*.

4. *Сохранение нового прецедента в базе прецедентов (Retain)*.

В соответствии с постановкой задачи предлагается представить в виде прецедентов информацию о конструкционных материалах и опыте их применения, сформировав таким образом библиотеку (базу) прецедентов. Иными словами, под прецедентом в данной работе понимается компактное описание знаний о конструкционном материале, содержащее наиболее важные параметры и свойства рассматриваемого объекта. При этом описание «проблемы» — это описание материала, сформированное на основе модели (рис. 1).

Наименование материала — это его название согласно стандарту. Тип материала характеризует его свойства, например, материал с повышенной или высокой прочностью, или триботехнического назначения, или с высокими упругими свойствами, или инструментальный материал и т.д. Физические свойства — это модуль упругости, модуль сдвига, коэффициент Пуассона, плотность, коэффициент линейного расширения; химические — электрохимический потенциал, устойчивость к коррозии и др.; механические — предел прочности, вязкость, предел текучести и др.; структурные — структурный класс, форма границ зерен, величина действительного зерна и др.

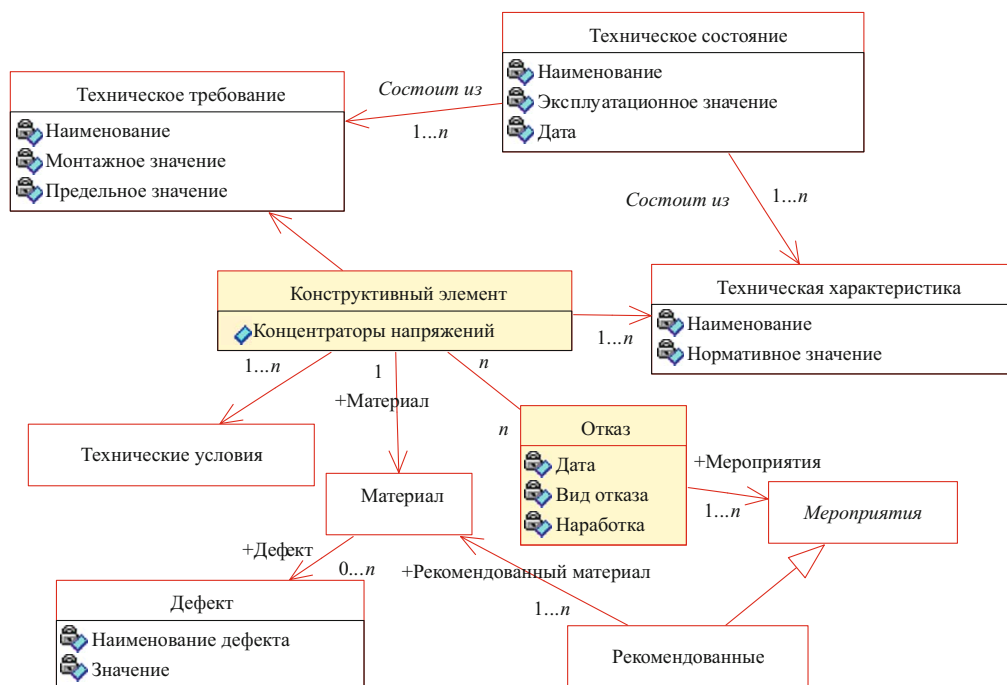


Рис. 2. Фрагмент базы данных оборудования, использованный для формирования «решения» по прецеденту

Конечно, для решаемой задачи использование полной модели (см. рис. 1) избыточно, поэтому в описание «проблемы» включен ограниченный набор основных свойств: жаропрочность, температура применения, ресурс, коррозионная стойкость, трещиностойкость, технологичность, стоимость и др.

Под «решением», как частью прецедента, понимается опыт применения материала при изготовлении и ремонте нефтехимического оборудования [25]. На рис. 2 представлен фрагмент модели БД по отказам оборудования, использованный при формировании «решения» по прецеденту. В частности, описание «решения» содержит: конструктивный элемент, условия

эксплуатации (в частности, давление, температуру, среду) и др.

В табл. 1 приведен пример прецедента для решаемой задачи. Прецедент включает информацию, характеризующую свойства материала и воздействующие на него факторы в рассматриваемой конструкции.

При извлечении (поиске) определяется мера подобия (близости) прецедентов, которая формируется путем сравнения их описаний с целью выявления качественных (отсутствие тех или иных признаков в описании) или количественных (наличие различных значений у одноименных признаков) отличий [11, 30]. При этом используются элементы теории распознавания образов [31], т.е. разрабатывается система распознавания, включающая словарь признаков и описание прецедентов с помощью разработанного словаря.

При решении данной задачи словарь признаков содержит свойства материалов, определенные при формировании описания «проблемы» и ее «решения».

Для повышения эффективности применения прецедентного подхода (по временному критерию) проводится индексация прецедентов [29]. Индексация повышает скорость поиска прецедента. При этом используются индексы двух видов: бинарные (...01001...), позволяющие определить наличие или отсутствие определенного признака в описании (табл. 2), и состоящие из кортежей {..., Св_i, ...} типа <id, v, w, c>, отражающие информацию об определенном признаке (id), его значении (v), важности или информационном весе (w), ограничения на интервале допустимых значений (c) и позволяющие определить количественные отличия в значениях признака.

Таблица 1. Пример прецедента

Описание	
Материал	20Х3МВФ
Жаропрочность	Да (обладает этим свойством)
Температура применения	До 500 – 560 °С
Ресурс	От 1000 до 10 000 ч при максимальной температуре, при температуре до 350 °С ресурс по жаропрочности неограничен
Коррозионная стойкость	Незначительная
Трещиностойкость	Да (обладает этим свойством)
Технологичность	Низкая
Стоимость	Высокая
Решение	
Конструктивный элемент	Теплообменная труба аппарата типа «труба в трубе»
Условия эксплуатации	Давление 160 МПа
Температура	300 °С
Среда	Слабоагрессивная

Мера подобия вычисляется как расстояние между прецедентами в признаковом пространстве на основе сравнения индексов с использованием метрики Ю. И. Журавлева [31] с нормированием полученного значения:

$$d_G(\bar{x}, \bar{y}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i h_G(x_i, y_i),$$

$$h_G(x_i, y_i) = \begin{cases} \text{количественные} & \begin{cases} 1, \text{ если } |x_i - y_i| < \zeta \\ 0 — \text{ в противном случае;} \end{cases} \\ \text{качественные} & \begin{cases} 1, x_i = y_i; \\ 0, x_i \neq y_i, \end{cases} \end{cases}$$

где w_i — вес признака; ζ — ограничение на отличие значений признаков.

Для приведения всех признаков к единому масштабу выполняется процедура стандартизации:

$$x_{ik} \rightarrow \frac{x_{ik} - \min_k x_{ik}}{\max_k x_{ik} - \min_k x_{ik}}.$$

При вычислении меры подобия могут учитываться субъективные предпочтения специалистов в виде «веса» того или иного признака в описании «проблемы». Важность признаков задается пользователем по десятибалльной шкале.

В результате извлечения (поиска) выявляется набор аналогов, упорядоченных в соответствии с мерой подобия (близости) описаний, при этом каждый аналог содержит описание определенного материала. В большинстве случаев полученной информации достаточно для принятия решения, однако возможно уточнение полученного решения. Поэтому для дальнейшей обработки найденных вариантов применяются методы многокритериального выбора.

Методы многокритериального выбора

Методы многокритериального выбора предназначены для обработки критериальных оценок альтернатив, и результат их применения может иметь один из трех видов: единственная (лучшая) альтернатива, упорядочение всех альтернатив и классификация на группы. В нашем случае требуется упорядочить имеющийся перечень вариантов (альтернатив), поэтому в дальнейшем будут рассматриваться только методы упорядочения (ранжирования) всех альтернатив.

Входная информация для всех методов многокритериального выбора представляет собой совокупность



Рис. 3. Принципиальная схема предлагаемого подхода

оценок всех допустимых альтернатив по некоторым критериям, каждый из которых измеряется по некоторой шкале значений (качественной, количественной).

В рассматриваемой задаче предлагаем в качестве критериев рассматривать параметры конструктивных материалов, хранящиеся в «описании» прецедентов. Дополнительным критерием будет выступать оценка близости прецедента.

После оценивания всех альтернатив по каждому критерию осуществляется обработка полученных критериальных оценок, в процессе которой от ЛПР может потребоваться дополнительная информация. Существует множество методов решения задачи многокритериального выбора, которые применяются для решения широкого спектра практических задач: методы свертки, анализа иерархий, вербального анализа, уступок, исследования пространства признаков и др. [32 – 37].

С целью повышения эффективности решения различных задач разрабатываются многометодные схемы или подходы, которые позволяют сократить время расчетов, повысить надежность результата, исключить «случайные» результаты, распараллелить процесс решения, определить область применения методов. Суть многометодного подхода заключается в решении одной и той же задачи несколькими различными методами, которые могут применяться одновременно, последовательно или попеременно.

Исходя из опыта успешного применения многометодного подхода [30, 38], было решено использовать его и в рассматриваемой задаче. На рис. 3 представлена принципиальная схема алгоритма совместного использования прецедентного подхода и методов многокритериального выбора.

Окончательное решение представляет собой список вариантов, упорядоченных по убыванию степе-

Таблица 2. Пример описания прецедентов с помощью бинарных индексов (1 и 0 — наличие и отсутствие свойства)

Материал	Теплостойкость	Жаростойкость	Жаропрочность	Технологичность	...	Индекс
20Х3МВФ	1	1	1	0	...	1110...
25Х2М1Ф	1	1	1	0	...	1110...
30ХМА	0	1	0	1	...	0101...
18Х3МВ	1	1	1	0	...	1110...
...	...	...	...	...	...	...

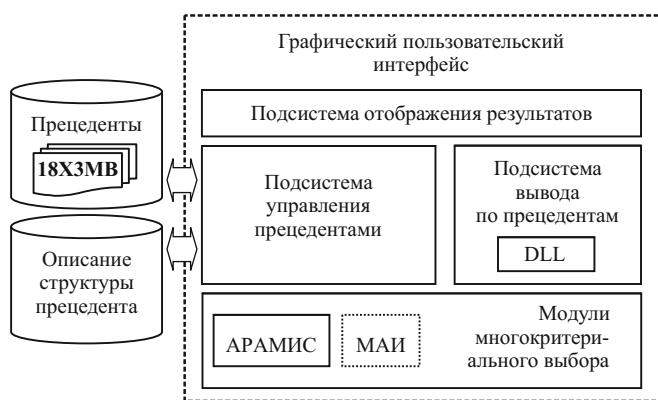


Рис. 4. Архитектура ИС ППР

```
[Metadata]
;template name
tempale_name=material
edited_by_user=Yes
[Fields]
konstruktivniy_element=val9:1
zharoprochnost=val4:1
...
[Captions]
form=Материал объекта
konstruktivniy_element=Конструктивный элемент
zharoprochnost=Жаропрочность
temperatura_primenenia=Температура применения
...
[Values]
val1:1=МАРТЕНСИТНЫЙ;ФЕРРИТНЫЙ
val2:1=СТАЛЬ
...
```

Рис. 5. Фрагмент файла с описанием структуры прецедента

ни их предпочтительности, и является результатом согласования оценок альтернатив по всем критериям и с учетом степени близости выбранных материалов к текущей ситуации.

Интеллектуальная система поддержки принятия решений

Предложенный подход реализован в виде интеллектуальной системы поддержки принятия решений (ИС ППР). Основные функции ИС ППР:

- управление библиотекой (базой) прецедентов, включая добавление, изменение, удаление описания материалов;

- поиск и извлечение прецедентов по заданному описанию;

- обработка результатов поиска при помощи методов многокритериального выбора;

- объяснение и отображение результатов.

С целью реализации основных функций предложена архитектура ИС ППР (рис. 4), в которую включены следующие составляющие.

Рис. 6. Пример формы ИС ППР, созданной динамически по описанию структуры прецедента

1. Подсистема управления библиотеками прецедентов, обеспечивающая подготовку данных (прецедентов) для их дальнейшей обработки. Особенностью данной подсистемы является возможность ее настройки на определенную структуру прецедента. Для этой цели используется специальный конфигурационный файл настройки (рис. 5), с помощью которого динамически создаются все формы ввода и редактирования (рис. 6). Для хранения прецедентов применяются структуры на XML, обеспечивающие автономность ИС ППР от систем управления базами данных.

2. Подсистема вывода (поиска решения) по прецедентам, реализованная в виде динамической библиотеки и обеспечивающая вычисление значений подобия (близости) с использованием метрики Ю. И. Журавлева.

3. Модули многокритериального выбора (АРАМИС, МАИ, ЗАПРОС I, ЗАПРОС II), которые также реализованы в виде подключаемых динамических библиотек. Механизм управления подключаемыми модулями позволяет вводить в состав ИС ППР программные модули, реализующие другие методы многокритериального выбора [20].

4. Подсистема отображения результатов, в настоящий момент использующая табличную форму представления результатов с их цветовой индикацией. Имеется также возможность просмотра и сравнения найденных прецедентов и объяснения процесса получения решения при помощи методов многокритериального выбора.

ИС ППР была апробирована при выборе материала труб, предназначенных для работы в качестве теплообменных под высоким внутренним давлением, при температуре 300 °С, под воздействием на наружную поверхность слабо агрессивной среды, при требовании значительного ресурса и трещиностойкости в составе реактора типа «труба в трубе». База прецедентов

включает описание материалов труб в соответствии со справочниками [21, 39].

Таким образом, рассмотрен подход для повышения эффективности и качества принятия инженерных решений, в том числе при выборе конструкционных материалов, имеющих особое значение в химическом и нефтехимическом машиностроении для обеспечения техногенной безопасности. Способ основан на объединении методов поиска решений на основе прецедентов и теории многокритериального выбора, что повышает качество принятия решений. Прецедентный подход обеспечивает выбор материала «по аналогии», а методы многокритериального выбора уточняют полученный результат и подтверждают его достоверность.

Разработано алгоритмическое и программное обеспечение интеллектуальной поддержки принятия решений. Прецедентный метод применим при наличии представительной базы прецедентов, содержащей опыт применения конструкционных материалов. Использование других метрик при поиске аналогов требует их проверки и адаптации для конкретных задач.

ЛИТЕРАТУРА

- Машиностроение: энциклопедия. Т. 4 – 12 / Под ред. К. В. Фролова. — М.: Машиностроение, 2004.
- Махутов Н. А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. В 2 ч. — Новосибирск: Наука, 2005. — 950 с.
- Махутов Н. А. Проблемы диагностики резьбовых соединений с учетом механических свойств материала / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2014. Т. 80. № 7. С. 40 – 44.
- Берман А. Ф., Николайчук О. А. Модели, знания и опыт для управления техногенной безопасностью / Проблемы управления. 2010. № 2. С. 53 – 60.
- Ashby M. F. Multi-Objective Optimization in Material Design and Selection / Acta Materialia. 2000. Vol. 48. P. 359 – 369.
- Ashby M. F., Johnson K. Materials and Design: The Art and Science of Material Selection in Product Design. — Burlington, MA: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2002. P. 115 – 120.
- Ashby M. F., Brechet Y. J. M., Cebon D., Salvo L. Selection strategies for materials and processes / Mater. Design. 2004. Vol. 25. P. 51 – 67.
- Giachetti R. E. A decision support system for material and manufacturing process selection / J. Intelligent Manufact. 1998. Vol. 9. N 3. P. 265 – 276.
- Гаибова Т. В. Многокритериальная оптимизация инвестиционных проектов развития промышленных предприятий: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Самара, 2004. — 28 с.
- Дилигенский Н. В., Дымова Л. Г., Севастьянов П. В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология. — М.: Машиностроение, 2004. — 397 с.
- Ройзензон Г. В. Многокритериальный выбор вычислительных кластеров / Труды Института системного программирования РАН. 2005. Т. 12. С. 53 – 57.
- Соболь И. М., Статников Р. Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. Изд. 2-е. — М.: Дрофа, 2006. — 210 с.
- Денисова Л. А. Моделирование и оптимизация системы регулирования питания парогенератора энергоблока АЭС / Автоматизация в промышленности. 2013. № 7. С. 14 – 19.
- Bullinger H.-J., Warschat J., Fischer D. Knowledge-based system for material selection for design with new materials / Knowledge-Based Systems. 1991. Vol. 4. N 2. P. 95 – 102.
- Kumar S., Singh R. A short note on an intelligent system for selection of materials for progressive die components / J. Mater. Proc. Technol. 2007. Vol. 182. P. 456 – 461.
- Chen S.-M. A new method for tool steel materials under fuzzy environment / Fuzzy Sets Sys. 1997. Vol. 92. P. 265 – 274.
- Amen R., Vomacka P. Case-based reasoning as a tool for materials selection / Mater. Design. 2001. Vol. 22. N 5. P. 353 – 358.
- Rao R. V. A material selection model using graph theory and matrix approach / Mater. Sci. Eng. A. 2006. Vol. 431. P. 248 – 255.
- Степанова Т. И., Трохин В. Е., Кочетыгов А. Л., Гафитулин М. Ю., Бессарабов А. М. Экспертная система по выбору конструкционных материалов в технологии химических реактивов и особо чистых химических веществ / Успехи в химии и химической технологии. 2012. Т. 26. № 1(130). С. 84 – 87.
- Петровский А. Б. Теория принятия решений. — М.: Академия, 2009. — 400 с.
- Справочник по конструкционным материалам / Под ред. Б. Н. Арзамасова. — М.: Изд-во МГТУ им Н. Э. Баумана, 2005. — 409 с.
- Скобелев Д. О., Зайцева Т. М. Лабораторные информационные менеджмент-системы (ЛИМС) / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. Т. 75. № 12. С. 57 – 62.
- Берман А. Ф., Николайчук О. А., Юрин А. Ю. Автоматизация прогнозирования технического состояния и остаточного ресурса деталей уникальных машин и аппаратуры / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. Т. 75. № 3. С. 48 – 57.
- Берман А. Ф. Информатика катастроф / Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2012. № 3. С. 17 – 37.
- Берман А. Ф., Храмова В. К. Автоматизированная База Данных по отказам трубопроводов и трубчатых аппаратов высокого давления / Химическое и нефтяное машиностроение. 1993. № 2. С. 7 – 9.
- Aamodt A., Plaza E. Case-based reasoning: Foundational issues, methodological variations, and system approaches / AI Communications. 1994. Vol. 7. N 1. P. 39 – 59.
- Берман А. Ф., Николайчук О. А., Юрин А. Ю. Обеспечение безопасности технических объектов методом прецедентных экспертных систем / Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2008. № 5. С. 83 – 93.
- Берман А. Ф., Николайчук О. А., Юрин А. Ю. Интеллектуальная информационная система анализа отказов / Проблемы машиностроения и надежности машин. 2012. № 4. С. 88 – 96.
- Николайчук О. А., Юрин А. Ю. Применение прецедентного подхода для автоматизированной идентификации технического состояния деталей механических систем / Автоматизация и современные технологии. 2009. № 5. С. 3 – 12.
- Ройзензон Г. В. Интерактивные методы снижения размерности признакового пространства в задачах многокритериального принятия решений: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 2008.
- Распознавание, классификация, прогноз. Математические методы и их применение. Вып. 2. / Под ред. Ю. И. Журавлева. — М.: Наука, 1989. — 302 с.
- Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. — М.: Радио и связь, 1993. — 278 с.
- Земских Л. В., Самаров Е. К., Жданов А. А., Бабкова В. В. Применение генетических алгоритмов для оптимизации адаптивной системы управления мобильного робота на параллельном вычислительном комплексе / Труды Института системного программирования РАН. 2004. Т. 7. С. 48 – 52.
- Микони С. В. Теории и практика рационального выбора: монография. — М.: Маршрут, 2004. — 463 с.
- Васильев С. Н., Котлов Ю. В. Технология поиска компромисса при индивидуальном и групповом выборе / Равновесные модели экономики и энергетики / Труды Всеросс. конф., Иркутск — Северобайкальск, 3 – 7 июля 2005 г. — Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2005. С. 12 – 17.
- Подinovский В. В., Ногин В. Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. 2-е изд. — М.: Физматлит, 2007. — 256 с.
- Денисова Л. А. Автоматизация параметрического синтеза системы регулирования на основе многокритериальной оптимизации с использованием генетического алгоритма / Автоматизация в промышленности. 2013. № 12. С. 24 – 31.
- Белецкая С. Ю. Оптимизация принятия решений в САПР на основе интеграции многовариантного моделирования и адаптивной мультикомпонентной поисковой среды: автореф. дис. ... докт. техн. наук. — Воронеж, 2005. — 28 с.
- Сосуды и трубопроводы высокого давления: справочник. 2-е изд. / Под ред. А. М. Кузнецова, В. И. Лившица. — Иркутск: Типография № 1, 1999. — 600 с.

REFERENCES

1. Frolov K. V. et al. (eds.) Mashinostroenie: éntsiklopediya [Encyclopedia: Mechanical engineering]. Vol. 4 – 12. — Moscow: Mashinostroenie, 2004 [in Russian].
2. Makhutov N. A. Konstruktsionnaya prochnost', resurs i tekhnogennaya bezopasnost' [Structural strength, resources and technological safety]. In 2 parts. — Novosibirsk: Nauka, 2005 [in Russian].
3. Makhutov N. A. Problemy diagnostiki rez'bovykh soedinenii s uchetoм mekhanicheskikh svoystv materiala [Problems of Testing Threaded Connections with Allowance for the Mechanical Properties of the Material] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2014. Vol. 80. N 7. P. 40 – 44 [in Russian].
4. Berman A. F., Nikolaychuk O. A. Modeli, znaniya i opyt dlya upravleniya tekhnogennoi bezopasnost'yu [Model, knowledge and experience for control of technogenic safety] / Probl. Upravl. 2010. N 2. P. 53 – 60 [in Russian].
5. Ashby M. F. Multi-Objective Optimization in Material Design and Selection / Acta Mater. 2000. Vol. 48. P. 359 – 369.
6. Ashby M. F., Johnson K. Materials and Design: The Art and Science of Material Selection in Product Design. — Burlington, MA: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2002. P. 115 – 120.
7. Ashby M. F., Brechet Y. J. M., Cebon D., Salvo L. Selection strategies for materials and processes / Mater. Design. 2004. Vol. 25. P. 51 – 67.
8. Giachetti R. E. A decision support system for material and manufacturing process selection / J. Intelligent Manufact. 1998. Vol. 9. N 3. P. 265 – 276.
9. Gaibova T. V. Mnogokriterial'naya optimizatsiya investitsionnykh proektov razvitiya promyshlennykh predpriyatiy [Multicriteria optimization of investment projects of industrial enterprises development]. Author's Abstract of Candidate's Thesis. — Samara, 2004 [in Russian].
10. Diligenskii N. V., Dymova L. G., Sevast'yanov P. V. Nechetkoe modelirovanie i mnogokriterial'naya optimizatsiya proizvodstvennykh sistem v usloviyakh neopredelennosti: tekhnologiya, ekonomika, ékologiya [Fuzzy modeling and multi-criteria optimization of production systems under uncertainty: technology, economics, ecology]. — Moscow: Mashinostroenie, 2004 [in Russian].
11. Roizenzon G. V. Mnogokriterial'nyi vybor vychislitel'nykh klasterov [Multicriteria decision making of computing clusters] / Trudy Inst. Sist. Progr. RAN. 2005. Vol. 12. P. 53 – 57 [in Russian].
12. Sobol' I. M., Statnikov R. B. Vybor optimal'nykh parametrov v zadachakh so mnogimi kriteriyami [The selection of optimal parameters in multicriteria problems]. Second edition. — Moscow: Drofa, 2006 [in Russian].
13. Denisova L. A. Modelirovanie i optimizatsiya sistemy regulirovaniya pitaniya parogeneratora énergebloka AES [Modeling and optimization of the control system power steam generator NPP] / Avtomatiz. Promysl. 2013. N 7. P. 14 – 19 [in Russian].
14. Bullinger H.-J., Warschat J., Fischer D. Knowledge-based system for material selection for design with new materials / Knowledge-Based Systems. 1991. Vol. 4. N 2. P. 95 – 102.
15. Kumar S., Singh R. A short note on an intelligent system for selection of materials for progressive die components / J. Mater. Proc. Technol. 2007. Vol. 1821. P. 456 – 461.
16. Chen S.-M. A new method for tool steel materials under fuzzy environment / Fuzzy Sets Sys. 1997. Vol. 92. P. 265 – 274.
17. Amen R., Vomacka P. Case-based reasoning as a tool for materials selection / Mater. Design. 2001. Vol. 22. N 5. P. 353 – 358.
18. Rao R. V. A material selection model using graph theory and matrix approach / Mater. Sci. Eng. A. 2006. Vol. 431. P. 248 – 255.
19. Stepanova T. I., Trokhin V. E., Kochetygov A. L., Gafitulin M. Yu., Bessarabov A. M. Ékspertnaya sistema po vyboru konstruktsionnykh materialov v tekhnologii khimicheskikh reaktivov i osobo chistykh khimicheskikh veshchestv [Expert system for the selection of structural materials in the technology of chemical reactants and especially pure chemical substances] / Usp. Khimii Khim. Tekhnol. 2012. Vol. 26. N 1(130). P. 84 – 87 [in Russian].
20. Petrovskii A. B. Teoriya prinyatiya reshenii [The decision theory]. — Moscow: Akademiya, 2009 [in Russian].
21. Arzamasov B. N. (ed.). Spravochnik po konstruktsionnym materialam [Handbook of structural materials]. — Moscow: Izd. MG TU im N. É. Bauman, 2005 [in Russian].
22. Skobelev D. O., Zaitseva T. M. Laboratornye informatsionnye menedzhment-sistemy (LIMS) [Laboratory Information Management Systems (LIMS)] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2009. Vol. 75. N 12. P. 57 – 62 [in Russian].
23. Berman A. F., Nikolaichuk O. A., Yurin A. Yu. Avtomatizatsiya prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya i ostatchnogo resursa detalей unikal'nykh mashin i apparatury [Automation of predicting technical state and remaining life time of the parts of unique machines and equipment] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2009. Vol. 75. N 3. P. 48 – 57 [in Russian].
24. Berman A. F. Informatika katastrof [Computer science for accidents investigation] / Probl. Bezopasn. Chrezv. Sit. 2012. N 3. P. 17 – 37 [in Russian].
25. Berman A. F., Khramova V. K. Avtomatizirovannaya baza dannykh po otkazam truboprovodov i trubchatykh apparatov vysokogo davleniya [Automated Database for pipeline failures and tubular pressure washers] / Khim. Neft. Mashinostr. 1993. N 2. P. 7 – 9 [in Russian].
26. Aamodt A., Plaza E. Case-based reasoning: Foundational issues, methodological variations, and system approaches / AI Communications. 1994. Vol. 7. N 1. P. 39 – 59.
27. Berman A. F., Nikolaichuk O. A., Yurin A. Yu. Obespechenie bezopasnosti tekhnicheskikh ob'ektov metodom pretsedentnykh ékspertnykh sistem [Ensuring the safety of technical objects by precedent expert systems] / Probl. Bezopasn. Chrezv. Sit. 2008. N 5. P. 83 – 93 [in Russian].
28. Berman A. F., Nikolaichuk O. A., Yurin A. Yu. Intellektual'naya informatsionnaya sistema analiza otkazov [Intelligent information system failure analysis] / Probl. Mashinostr. Nadezhn. Mashin. 2012. N 4. P. 88 – 96 [in Russian].
29. Nikolaichuk O. A., Yurin A. Yu. Primenenie pretsedentnogo podkhoda dlya avtomatizirovannoi identifikatsii tekhnicheskogo sostoyaniya detalей mekhanicheskikh sistem [Application of case-based reasoning approach for the automated identification of the technical condition of mechanical systems details] / Avtomatiz. Sovr. Tekhnol. 2009. N 5. P. 3 – 12 [in Russian].
30. Roizenzon G. V. Interaktivnye metody snizheniya razmernosti priznakovogo prostranstva v zadachakh mnogokriterial'nogo prinyatiya reshenii [Interactive methods of reducing the dimension of attribute set in the problems of multi-criteria decision-making]. Author's Abstract of Candidate's Thesis. — Moscow, 2008 [in Russian].
31. Zhuravlev Yu. I. (ed.). Raspoznavanie, klassifikatsiya, prognoz. Matematicheskie metody i ikh primeneniye [Identification, classification, prognosis. Mathematical methods and their application]. Issue 2. — Moscow: Nauka, 1989. — 302 s. [in Russian].
32. Saati T. The Analytic Hierarchy Process. — New York: McGraw Hill, 1996.
33. Zemskikh L. V., Samarov E. K., Zhdanov A. A., Babkova V. V. Primenenie geneticheskikh algoritmov dlya optimizatsii adaptivnoi sistemy upravleniya mobil'nogo robota na parallelnom vychislitel'nom komplekse [Application of genetic algorithms to optimize the adaptive control system for a mobile robot on a parallel computer system] / Trudy Inst. Sist. Progr. RAN. 2004. Vol. 7. P. 48 – 52 [in Russian].
34. Mikoni S. V. Teorii i praktika ratsional'nogo vybora: monografiya [Theory and practice of rational choice: a monograph]. — Moscow: Marshrut, 2004 [in Russian].
35. Vasil'ev S. N., Kotlov Yu. V. Tekhnologiya poiska kompromissa pri individual'nom i gruppovom vybere / Ravnovesnye modeli ékonomiki i énergetiki [Technology search for a compromise of individual and group decision making] / Proc. of the All-Russian Conf. "Equilibrium Model of Economy and Energymaterials", Irkutsk – Severobaikalsk, 3 – 7 July 2005. — Irkutsk: Izd. ISE SO RAN, 2005. P. 12 – 17 [in Russian].
36. Podinovskii V. V., Nogin V. D. Pareto-optimal'nye resheniya mnogokriterial'nykh zadach [Pareto-optimal decision of multiobjective problems]. Second edition. — Moscow: Fizmatlit, 2007 [in Russian].
37. Denisova L. A. Avtomatizatsiya parametricheskogo sinteza sistemy regulirovaniya na osnove mnogokriterial'noi optimizatsii s ispol'zovaniem geneticheskogo algoritma [Automation of parametric synthesis control system based on multi-criteria optimization and genetic algorithm] / Avtomatiz. Promysl. 2013. N 12. P. 24 – 31 [in Russian].
38. Beletskaya S. Yu. Optimizatsiya prinyatiya reshenii v SAPR na osnove integratsii mnogovariantnogo modelirovaniya i adaptivnoi mul'tikomponentnoi poiskovoi sredy [Optimization of decision-making based on CAD integration of multiple modeling and adaptive multicomponent retrieval environment]. Author's Abstract of Doctoral Thesis. — Voronezh, 2005 [in Russian].
39. Kuznetsov A. M., Livshits V. I. (eds.). Sosudy i truboprovody vysokogo davleniya: spravochnik [Vessels and pipelines of high pressure: handbook]. Second edition. — Irkutsk: Tipografiya No. 1, 1999 [in Russian].